



Assessment of Earthquake Exposure in Tehran Province Road Network and Optimal Emergency Route Planning

Qasim Alidadi¹ , Mohammad Ali Nekooie² , Zohreh Arefi Khorrami^{*3} 

1. MSc. Student, Faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
2. Assoc. Prof., Faculty of Engineering and Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
3. MSc. Student, Dept. of Biotechnology, Faculty of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran (Corresponding Author) zohreh.arefi@aut.ac.ir



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.3.4.6>

Original Paper

Earthquakes are one of the most significant natural hazards threatening Tehran Province, with potential to severely damage critical infrastructure, including road networks. This research aims to evaluate the vulnerability and resilience of Tehran Province's road network against earthquakes using Geographic Information Systems (GIS). The study data includes shape files of Tehran Province, urban and provincial roads, fault lines, earthquakes from the past four decades, healthcare facilities, fire stations, and shelters, all analyzed in ArcGIS Desktop environment. Using Hot Spot analysis and density analysis, areas with high concentration of earthquake occurrences were identified. By creating a 10-kilometer buffer around fault lines and conducting overlap analysis with the road network, it was determined that 60.73 percent of the entire Tehran Province road network and 88.43 percent of Tehran city's road network are vulnerable to earthquake damage. Through network creation and conducting routing and facility allocation analyses, strategies for improving access to emergency centers during post-earthquake crisis situations were developed. The results of this research can significantly assist planners and crisis managers in enhancing the resilience of Tehran Province's transportation network and reducing its vulnerability to potential future earthquakes.

Keywords:

Resiliency, Road Network, Earthquake, Geographic Information System (GIS), Vulnerability, Tehran Province, Network Analysis.



Received: Apr. 05, 2025
Revised: May 12, 2025
Accepted: June 09, 2025

To cite this article:

Alidadi, Q., Nekooie, M. A., Arefi Khorrami, Z. 2025. Assessment of earthquake exposure in tehran province road network and optimal emergency route planning. *Emergency Management*, 14(3), 59-80.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.3.4.6>

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ارزیابی مناطق در معرض خطر گسل در شبکه راه استان تهران و برنامه‌ریزی مسیر اضطراری

قاسم علی‌دادی^۱، محمدعلی نکویی^۲، زهره عارفی خرمی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۳- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گرایش بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران (نویسنده مسئول) zohreh.arefi@aut.ac.ir



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.3.4.6>

مقاله پژوهشی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
تاب‌آوری، شبکه راه، زلزله،
سیستم اطلاعات جغرافیایی
(GIS)، آسیب‌پذیری، استان
تهران، تحلیل شبکه

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶
اصلاح: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

زلزله یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی تهدیدکننده استان تهران است که می‌تواند آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های حیاتی از جمله شبکه راه‌ها وارد کند. این پژوهش با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری شبکه راه‌های استان تهران در برابر زلزله با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شده است. داده‌های پژوهش شامل لایه‌های شیپ فایل استان تهران، معابر شهری و استانی، گسل‌ها، زلزله‌های چهار دهه اخیر، مراکز درمانی، ایستگاه‌های آتش‌نشانی و مراکز اسکان اضطراری در محیط ArcGIS Desktop مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. با استفاده از تحلیل‌های Hot Spot و تحلیل چگالی، نواحی با تراکم بالای رخدادهای زلزله شناسایی شدند. همچنین با ایجاد حریم ۱۰ کیلومتری اطراف گسل‌ها و تحلیل همپوشانی با شبکه معابر، مشخص شد که ۶۰/۷۳ درصد از کل شبکه معابر استان تهران و ۸۸/۴۳ درصد از شبکه معابر شهر تهران در معرض آسیب‌پذیری قرار دارند. با ایجاد شبکه راهی (Network) و انجام تحلیل‌های مسیریابی و تخصیص تسهیلات، راهکارهایی برای بهبود دسترسی به مراکز امدادی در شرایط بحرانی پس از زلزله ارائه شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند به برنامه‌ریزان و مدیران بحران در راستای ارتقای تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل استان تهران و کاهش آسیب‌پذیری آن در برابر زلزله‌های احتمالی آینده کمک شایانی نماید.

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله
به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

علی‌دادی، ق، نکویی، م، ع، عارفی خرمی، ز. ۱۴۰۴، ارزیابی مناطق در معرض خطر گسل در شبکه راه استان تهران و

برنامه‌ریزی مسیر اضطراری. مدیریت بحران، ۱۴(۳)، ۸۰-۵۹

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.3.4.6>



© The Author(s).
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

زلزله به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی غیرقابل پیش‌بینی، همواره تهدیدی جدی برای سکونتگاه‌های انسانی به شمار می‌رود [۱] و [۲]. استان تهران با جمعیت ۱۳،۲۶۷،۶۳۷ نفر و به‌عنوان مرکز سیاسی، اقتصادی و اداری کشور، بر روی پهنه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بالا قرار دارد [۳] و [۴].

وجود گسل‌های متعدد فعال در محدوده و اطراف استان تهران مانند گسل‌های شمال تهران، مشاء، ری و کهریزک، این منطقه را به یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق کشور در برابر زلزله تبدیل کرده است [۵].

سوابق تاریخی نیز نشان می‌دهد که زلزله‌های مخربی با بزرگی قابل توجه در گذشته این منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند [۶] [۷]. با توجه به گسترش روزافزون شهرنشینی و افزایش تراکم جمعیت و ساخت‌وسازها در استان تهران، لزوم توجه به مفهوم تاب‌آوری در برابر زلزله و برنامه‌ریزی برای کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی بیش‌ازپیش احساس می‌شود. مفهوم تاب‌آوری که از دهه ۱۹۸۰ میلادی در ادبیات علمی مطرح شده است [۸]، در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران و برنامه‌ریزان شهری را به خود جلب کرده است.

تاب‌آوری به معنای توانایی یک سیستم برای جذب اختلالات، سازمان‌دهی مجدد و حفظ ساختار و عملکرد اصلی خود است [۹]. در زمینه مخاطرات طبیعی، تاب‌آوری به قابلیت جوامع در مقاومت، انطباق و بازیابی در برابر اثرات مخرب مخاطرات اطلاق می‌شود [۱۰].

در دهه‌های اخیر چارچوب‌ها و مدل‌های متعددی برای سنجش و ارزیابی تاب‌آوری ارائه شده است که هر یک ابعاد و شاخص‌های متفاوتی را مورد توجه قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال چارچوب DROP (Disaster Resilience Of Place)

که توسط کاتر و همکاران در سال ۲۰۰۸ ارائه شد، تاب‌آوری را از منظر مکان محور موردبررسی قرار می‌دهد و بر تعامل بین آسیب‌پذیری و تاب‌آوری ذاتی مکان تأکید دارد [۱۱]. این چارچوب به عوامل اجتماعی، اقتصادی، نهادی، زیرساختی و سرمایه اجتماعی توجه ویژه‌ای دارد [۱۱].

چارچوب BRIC (Baseline Resilience Indicators for Communities) نیز که توسط همین پژوهشگران توسعه یافت، مجموعه‌ای از شاخص‌های پایه را برای سنجش تاب‌آوری جوامع ارائه می‌کند و امکان مقایسه تاب‌آوری در مقیاس‌های مختلف را فراهم می‌آورد [۱۲].

مدل CDRI (Community Disaster Resilience Index) از دیگر مدل‌های ارزیابی تاب‌آوری بوده که تاب‌آوری جوامع را در چهار بعد اجتماعی، اقتصادی، نهادی و زیرساختی مورد ارزیابی قرار می‌دهد [۱۳].

چارچوب PEOPLES (Population, Environment, Organized services, Physical infrastructure, Lifestyle, Economic, Social capital) نیز، تاب‌آوری را در هفت بعد جمعیت، محیط‌زیست، خدمات سازمان‌یافته، زیرساخت‌های فیزیکی، سبک زندگی، اقتصاد و سرمایه اجتماعی موردبررسی قرار می‌دهد [۱۴]. همچنین روش‌شناسی ResilUS نیز با رویکردی دینامیکی، تاب‌آوری را در طول زمان و در سطوح مختلف از خانوار تا جامعه مدل‌سازی می‌کند و امکان شبیه‌سازی فرآیند بازیابی پس از سانحه را فراهم می‌آورد [۱۵].

وجه مشترک تمامی این چارچوب‌ها و مدل‌ها، توجه به شاخص زیرساختی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در ارزیابی تاب‌آوری است. زیرساخت‌های حیاتی شامل شبکه‌های آب، برق، گاز، ارتباطات و حمل‌ونقل، نقشی اساسی در تداوم حیات و عملکرد یک جامعه دارند [۱۶].

در این میان، زیرساخت حمل‌ونقل و شبکه معابر جایگاه ویژه‌ای دارد و خود را از دیگر زیرساخت‌های حیاتی متمایز ساخته است. این تمایز ناشی از اهمیت استراتژیک شبکه حمل‌ونقل در تخلیه اضطراری، امدادسانی، دسترسی به مراکز درمانی و خدماتی و نیز بازیابی و بازسازی پس از سانحه است [۱۷]. آسیب به شبکه حمل‌ونقل می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد سایر زیرساخت‌ها شده و پیامدهای منفی آن را تشدید کند [۱۷].

سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌عنوان ابزاری کارآمد، امکان تحلیل فضایی و مدل‌سازی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری زیرساخت‌ها را فراهم می‌آورد [۱۸]. قابلیت‌های تحلیلی GIS مانند تحلیل‌های مکانی، همپوشانی لایه‌ها، تحلیل شبکه و مدل‌سازی فضایی، امکان ارزیابی جامع و دقیق آسیب‌پذیری شبکه حمل‌ونقل در برابر مخاطرات طبیعی از جمله زلزله را میسر می‌سازد [۱۹]. با استفاده از این قابلیت‌ها می‌توان نقاط آسیب‌پذیر شبکه را شناسایی کرده و راهکارهایی برای ارتقای تاب‌آوری آن ارائه نمود [۲۰].

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری شبکه راه‌های استان تهران در برابر زلزله با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های مکانی شامل لایه‌های شبکه معابر، گسل‌ها، زلزله‌های رخ داده در چهار دهه اخیر و مراکز خدماتی و امدادی، آسیب‌پذیری شبکه راه‌ها در برابر زلزله احتمالی مورد تحلیل قرار گرفته و راهکارهایی برای ارتقای تاب‌آوری آن ارائه شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های شهری و منطقه‌ای، مدیریت بحران و کاهش خطرپذیری زلزله در استان تهران مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش‌شناسی پژوهش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

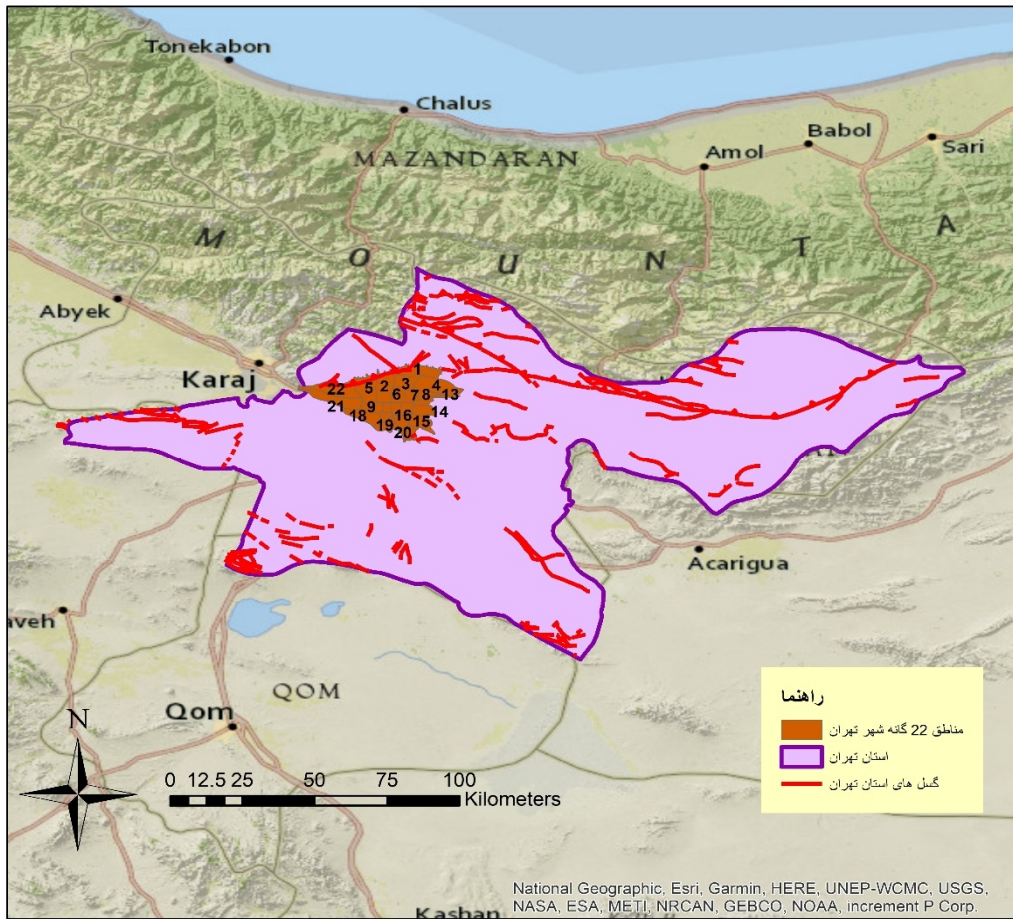
استان تهران با مساحتی حدود ۱۲'۹۸۱ کیلومتر مربع در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده است [۲۱]. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از شرق به استان سمنان و از غرب به استان البرز محدود می‌شود [۲۱]. بر اساس آخرین سرشماری، جمعیت استان تهران بالغ بر ۱۳'۲۶۷'۶۳۷ نفر است که حدود ۱۵،۳۸ درصد جمعیت کل کشور را در خود جای داده است [۳].

شهر تهران به‌عنوان مرکز استان و پایتخت کشور، کانون فعالیت‌های سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی محسوب می‌شود. استان تهران از نظر زمین‌شناسی در منطقه‌ای با فعالیت لرزه‌خیزی بالا قرار گرفته است [۴]. گسل‌های متعددی از جمله گسل شمال تهران با طول تقریبی ۹۰ کیلومتر، گسل مشاء (فشم) با طول حدود ۲۰۰ کیلومتر، گسل ری با طول تقریبی ۲۰ کیلومتر و گسل کهریزک در این منطقه شناسایی شده‌اند [۵].

مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که فعالیت این گسل‌ها می‌تواند منجر به وقوع زلزله‌هایی با بزرگی ۶ تا ۷/۵ ریشتر شود [۲۲]. بر اساس نقشه موجود در شکل ۱، مناطق ۱ تا ۵ شهر تهران و نیز، منطقه ۲۰ و ۲۲ در محدوده گسل‌های اصلی و فعال استان تهران قرار می‌گیرند و به‌عنوان مناطق زلزله‌خیز شناخته می‌شوند.

۲-۲- داده‌ها و منابع اطلاعاتی

شبکه راه‌های استان تهران شامل مسیر سوارکاری، خط ویژه اتوبوس، مسیر ویژه دوچرخه، پیاده‌رو، مسیر سبز، آزادراه، رمپ آزادراه، مسیر عابر پیاده، راه اصلی درجه ۱، رمپ راه اصلی، خیابان محلی، راه اصلی درجه ۲، رمپ راه اصلی درجه ۲، راه دسترسی خدماتی، پله‌ها،



شکل ۱- نمایی از گسل‌های استان تهران و بخش‌های تحت تأثیر

راه فرعی، رمپ راه فرعی، راه روستایی، راه روستایی درجه ۱، راه روستایی درجه ۲، راه روستایی درجه ۳، راه روستایی درجه ۴، راه روستایی درجه ۵، بزرگراه، رمپ بزرگراه و راه فرعی طبقه‌بندی نشده، با مجموع طول ۳۷،۴۹۰ کیلومتر، از مرکز داده‌های جغرافیایی ایران تهیه شد [۲۳].

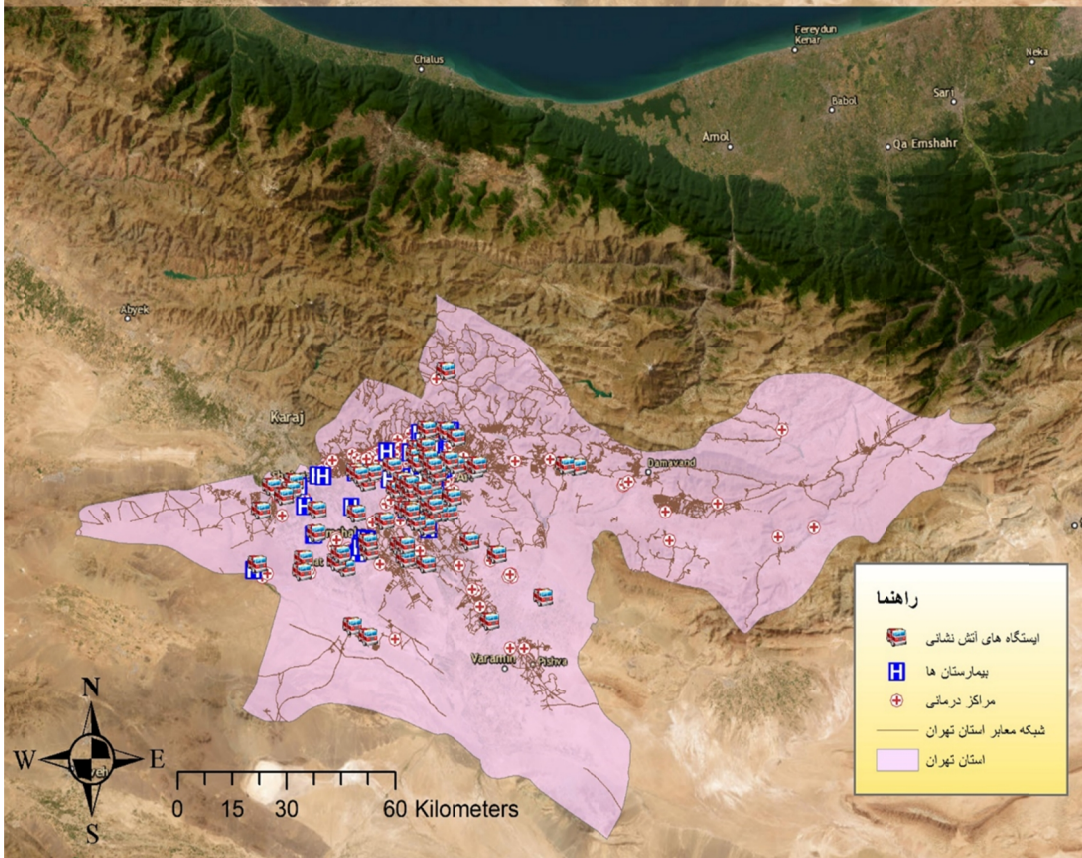
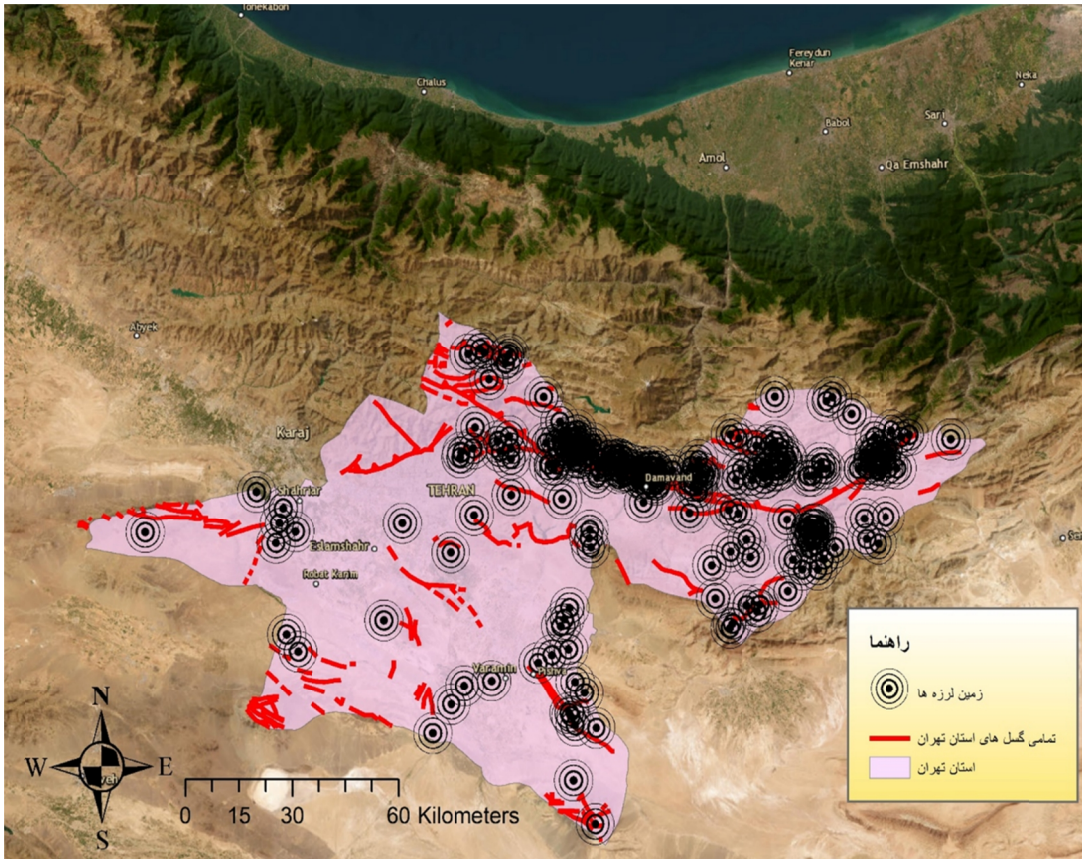
این شبکه نقش حیاتی در جابجایی روزانه بیش از ۱۰ میلیون سفر درون‌شهری و برون‌شهری ایفا می‌کند. اطلاعات مربوط به زلزله‌های رخ داده در استان تهران طی دوره زمانی ۴۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۲۵)، شامل ۲۵۱ رخداد زلزله با بزرگی بیش از ۲.۵ ریشتر به همراه اطلاعات توصیفی مرتبط با هر زلزله شامل مختصات جغرافیایی (طول و عرض)، تاریخ وقوع، بزرگی، عمق و دقت ثبت، از مرکز لرزه‌نگاری

کشور تهیه شد [۷]. همچنین شیپ فایل پلی گونی مرز استان تهران و تقسیمات شهرستانی آن، شیپ فایل خطی تمامی گسل‌های استان تهران و شیپ فایل نقطه‌ای مراکز امدادی-خدماتی شامل موقعیت مراکز تجمع، بیمارستان‌ها، مراکز درمانی، ایستگاه‌های آتش‌نشانی و مراکز اسکان اضطراری نیز از مرکز داده‌های جغرافیایی ایران تهیه شد [۲۳].

شکل ۲ نمایی از تمامی لایه‌های مذکور را نشان می‌دهد. تمامی آنالیزها و تحلیل‌های مربوطه، در نرم‌افزار ArcGIS Desktop ورژن ۱۰/۶ انجام پذیرفت.

۲-۳- تحلیل الگوی زلزله‌های چهار دهه گذشته

برای تحلیل الگوی مکانی زلزله‌های رخ داده در



شکل ۲- نمایی از لایه‌های استفاده‌شده در استان تهران

استان تهران طی دوره زمانی ۴۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۲۵)، از تحلیل‌های فضایی پیشرفته در محیط GIS استفاده شد. ابتدا لایه نقطه‌ای زلزله‌ها که شامل ۲۵۱ رخداد زلزله با بزرگی بیش از ۲٫۵ ریشتر بود، به همراه اطلاعات توصیفی مرتبط با هر زلزله شامل مختصات جغرافیایی (طول و عرض)، تاریخ وقوع، بزرگی، عمق و دقت ثبت، از مرکز لرزه‌نگاری کشور تهیه و وارد پایگاه داده مکانی شد.

به‌منظور شناسایی الگوی خوشه‌ای یا پراکندگی زلزله‌ها، ابتدا تحلیل نقاط حاد (Hot Spot) به کار گرفته شد. در این تحلیل، از آماره Getis-Ord G_i^* استفاده شد که برای هر عارضه در مجموعه داده‌ها، امتیاز Z و مقدار p محاسبه می‌کند. این آماره نشان می‌دهد چه مکانی عوارضی با مقادیر بالا یا پایین (در اینجا بزرگی زلزله) به‌صورت خوشه‌ای تجمع یافته‌اند و خوشه‌های فضایی معنادار از لحاظ آماری، مناطق با بزرگی بالای زلزله (نقاط حاد) و مناطق با بزرگی پایین زلزله (نقاط سرد) را مشخص می‌سازد. در این تحلیل، فیلد بزرگی زلزله (Magnitude) به‌عنوان متغیر تحلیل انتخاب شد. همچنین از آزمون FDR^1 برای تصحیح سطح اطمینان آماری استفاده شد. آزمون FDR یکی از روش‌های آماری پیشرفته برای کنترل نرخ خطای آماری در آزمون‌های فرضیه چندگانه است. در تحلیل‌های مکانی مانند نقاط حاد، از آنجاکه هم‌زمان چندین آزمون آماری انجام می‌شود، احتمال رخداد خطای نوع اول (شناسایی اشتباه یک خوشه معنادار) افزایش می‌یابد. FDR این خطا را کنترل کرده و تنها خوشه‌هایی را به‌عنوان معنادار شناسایی می‌کند که احتمال اینکه نتیجه تصادفی باشند، بسیار پایین است.

در گام بعدی، برای شناسایی مناطق با تراکم بالای رخداد زلزله و با در نظر گرفتن بزرگی

آن‌ها، از تحلیل چگالی کرنل (Kernel Density) استفاده شد. در این تحلیل، لایه نقطه‌ای زلزله‌ها به‌عنوان لایه ورودی و فیلد بزرگی زلزله به‌منظور وزن‌دهی آن انتخاب شد. برای دستیابی به خروجی مناسب‌تر و قابل تفسیرتر، از روش طبقه‌بندی Natural Breaks (Jenks) با ۵ طبقه استفاده شد تا مناطق با تراکم مختلف زلزله به‌وضوح قابل تشخیص باشند.

۲-۴-۲- ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه راه‌ها

به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه راه‌های استان تهران در برابر زلزله، روش‌شناسی چندمرحله‌ای و مبتنی بر تحلیل‌های مکانی در محیط GIS به کار گرفته شد. این روش‌شناسی با هدف شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر شبکه راه و تعیین میزان تاب‌آوری زیرساختی در سطح استان طراحی شد.

۲-۴-۱- تعیین محدوده‌های تأثیر گسل

با استفاده از ابزار Buffer، محدوده تأثیر گسل‌ها برای شناسایی مناطق با پتانسیل خطر بالا تعیین شد. بر اساس مطالعات پیشین و استانداردهای مهندسی زلزله، شعاع ۱۰ کیلومتری از هر گسل به‌عنوان محدوده با خطر بالای آسیب‌پذیری در نظر گرفته شد [۲۴].

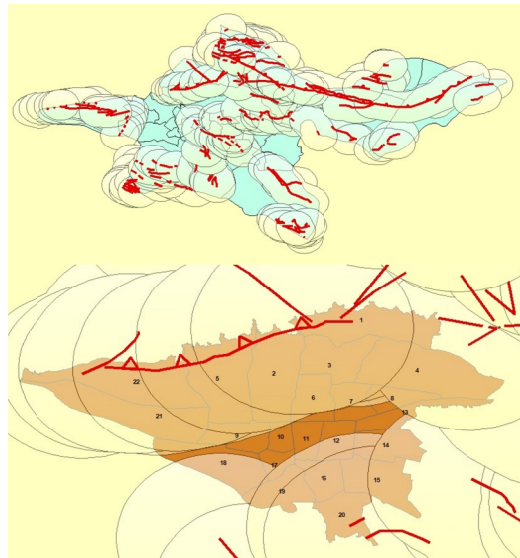
این انتخاب بر پایه مطالعات تجربی و مدل‌های تخمین آسیب ناشی از زلزله در اطراف گسل‌های فعال صورت گرفت. لایه خروجی این تحلیل به‌صورت یک‌لایه چندضلعی (Polygon) حاوی پهنه‌های پرخطر اطراف گسل‌ها حاصل شد. در تصویر ۳، حریم ۱۰ کیلومتری اطراف گسل در محدوده استان تهران و نیز شهر تهران قابل مشاهده است.

¹ False Discovery Rate (FDR)

زیرگذرها را فراهم می‌آورد. مشخصاتی نظیر طول (متر) و زمان پیمایش مسیر (دقیقه) به‌عنوان هزینه و یک‌طرفه بودن مسیر به‌عنوان محدودیت در شبکه تعریف شدند. پس از ایجاد شبکه، تحلیل نزدیک‌ترین تسهیلات در دو مرحله انجام شد:

مرحله اول: تعیین بهترین مسیرهای زمانی از مراکز تجمع شهروندان به مراکز اسکان اضطراری موجود در شهر تهران

مرحله دوم: تعیین بهترین مسیرهای زمانی از ایستگاه‌های آتش‌نشانی به نقاط آسیب‌پذیر شهر تهران در برابر زلزله.



شکل ۳- محدوده ۱۰ کیلومتری تأثیر گسل اطراف شهر و استان تهران

۲-۵-۱- تحلیل شبکه محل‌های اجتماع و مراکز اسکان اضطراری شهر تهران

هدف از این تحلیل، یافتن بهترین مسیرهای انتقال شهروندان از مراکز تجمع شهر تهران به مراکز اسکان اضطراری موجود است. پس از وارد کردن مجموع داده‌های مربوط به محل‌های اجتماع شهر تهران در بخش Incidents و مراکز اسکان اضطراری آن در بخش Facility، Impedance یا پارامتر تعیین‌کننده، بر روی ویژگی زمانی قرار گرفته شد تا بهترین مسیر به لحاظ زمانی جستجو شود. با این حال در زبانه Accumulation Attributes، هر دو فیلد زمان و مسافت در نظر گرفته شد. تعداد مراکز اسکان اضطراری مورد جستجو اطراف هر مرکز تجمع، ۳ در نظر گرفته شد و مسیر حرکت از Incidents به Facility تنظیم شد.

۲-۵-۲- تحلیل شبکه ایستگاه‌های آتش‌نشانی و محل‌های آسیب‌پذیر شهر تهران

این آنالیز با هدف یافتن بهترین مسیرهای امداد رسانی به نقاط آسیب‌پذیر شهر تهران انجام شد. پس از تعیین کردن نقاط آسیب‌پذیر شهر تهران در برابر زلزله (خروجی آنالیز همپوشانی

۲-۴-۲- تحلیل همپوشانی محدوده تأثیر گسل بر شبکه معابر

برای شناسایی بخش‌هایی از شبکه راه که در محدوده خطر گسل‌ها قرار دارند، از ابزار Intersect استفاده شد. با استفاده از این ابزار، همپوشانی بین لایه شبکه راه‌های استان تهران و لایه بافر ۱۰ کیلومتری گسل‌ها محاسبه شد. خروجی این تحلیل، یک لایه خطی جدید شامل بخش‌هایی از شبکه راه است که در معرض خطر ناشی از گسل‌ها قرار دارند. همین تحلیل به‌طور جداگانه برای شبکه معابر شهر تهران نیز انجام شد تا میزان آسیب‌پذیری راه‌های درون‌شهری نیز مشخص شود.

۲-۵-۳- ایجاد شبکه تحلیل مسیر

برای ارزیابی دسترسی‌پذیری و عملکرد شبکه معابر در شرایط بحرانی، یک مجموعه داده شبکه‌ای در محیط GIS ایجاد شد. در این شبکه، ضمن استفاده از مدل جهانی برای پیچ‌ها، از مدل ارتفاعی برای ایجاد تمایز بین تقاطع‌ها و تبادل‌های غیرهمسطح استفاده شد. این تمایز امکان مسیریابی دقیق‌تر در محل تقاطع پل‌ها و

در بخش Incidents و ایستگاه‌های آتش‌نشانی در بخش Facility، Impedance بر روی ویژگی زمانی قرار گرفته شد تا بهترین مسیر به لحاظ زمانی جستجو شود. با این حال در زبانه Accumulation Attributes، هر دو فیلد زمان و مسافت در نظر گرفته شد. تعداد Facility مورد جستجو اطراف هر محل، ۳ در نظر گرفته شد و مسیر حرکت از Facility به Incidents تنظیم شد.

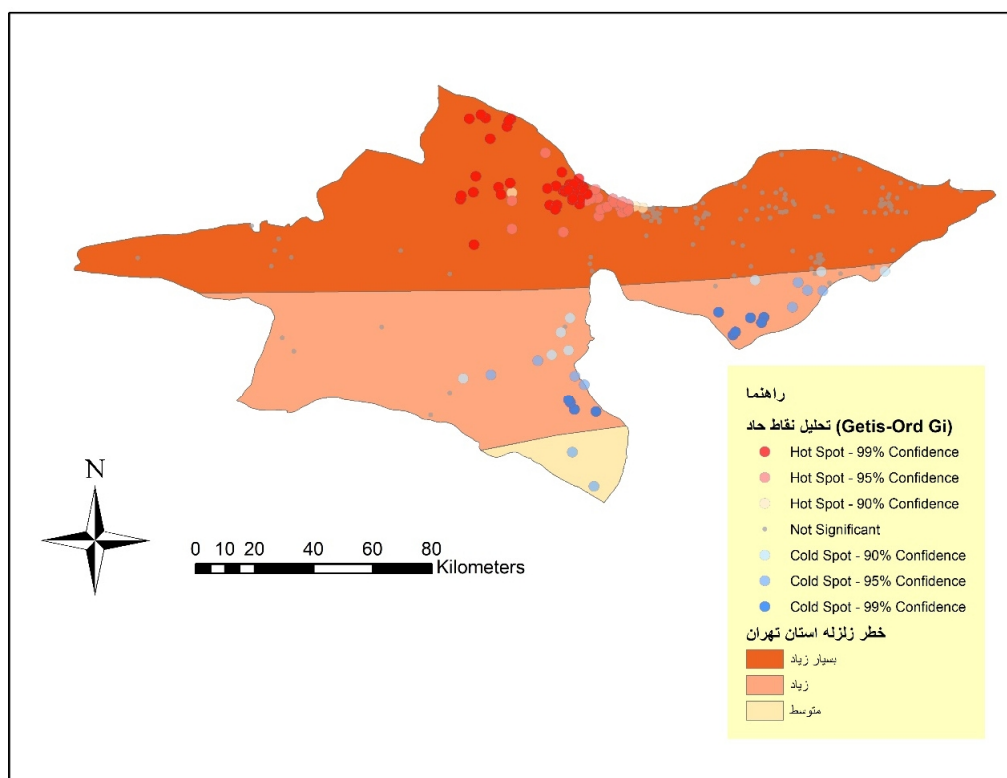
۳- یافته‌ها

۳-۱- نتایج حاصل از تحلیل الگوی زلزله‌های چهار دهه گذشته

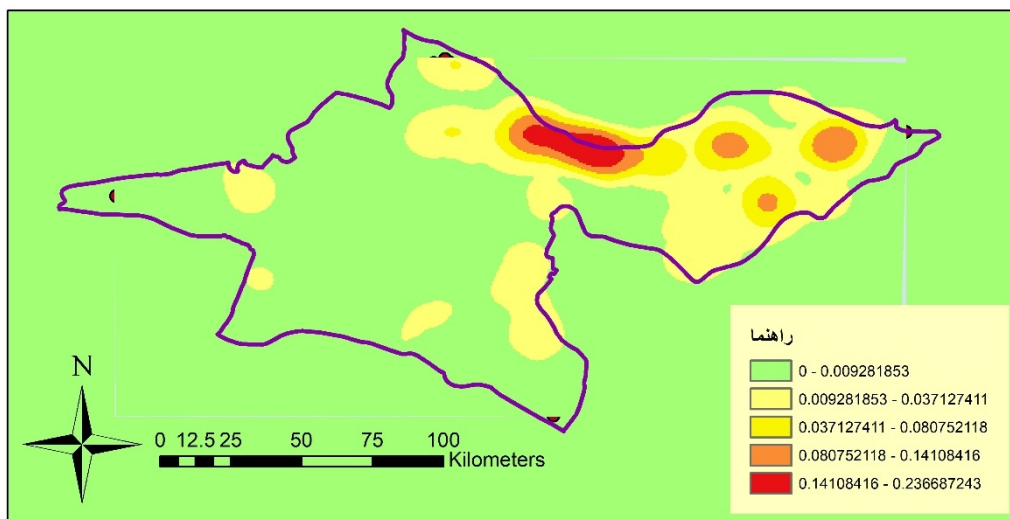
نتایج تحلیل Hot Spot که در شکل ۴ نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که خوشه‌های معناداری از زلزله‌های با بزرگی بالا (نقاط حاد) در بخش‌های شمالی و شمال شرقی استان تهران و منطبق بر مسیر گسل‌های شمال تهران و مشاء وجود دارد. همچنین خوشه‌هایی از زلزله‌های با

بزرگی کمتر (نقاط سرد) در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی استان قابل مشاهده است. این الگو نشان‌دهنده فعالیت لرزه‌ای متفاوت در بخش‌های مختلف استان است و می‌تواند در پیش‌بینی مناطق با خطر بالقوه لرزه‌خیزی در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

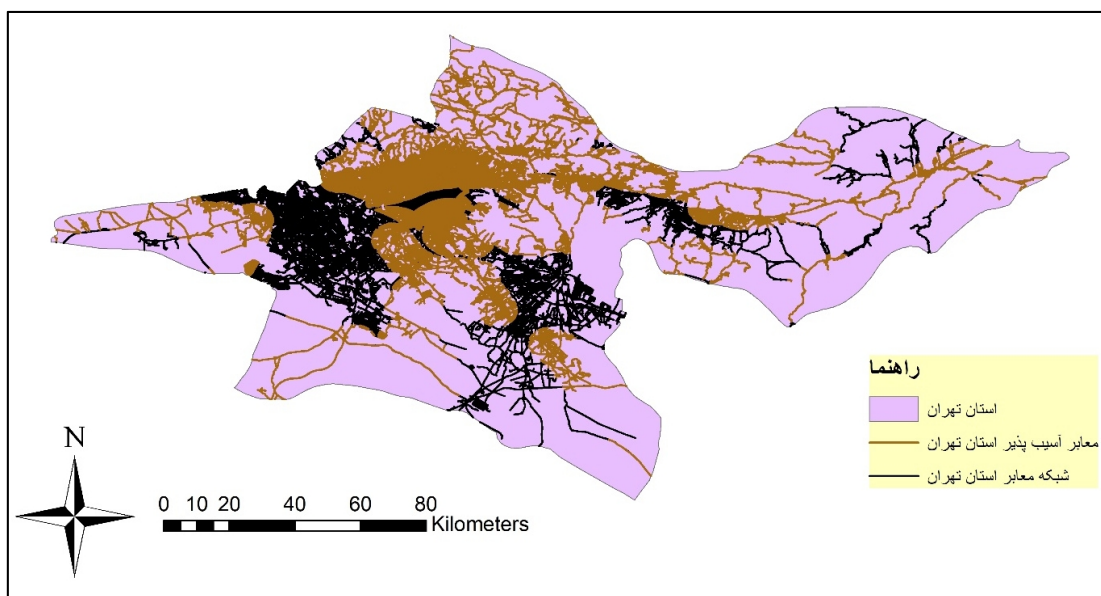
همچنین نتایج تحلیل چگالی کرنل که در شکل ۵ ارائه شده است، نشان می‌دهد که بیشترین تراکم رخداد زلزله؛ بر حسب تعداد رخداد در کیلومتر مربع، در محدوده شمالی و شمال شرقی استان تهران و در امتداد گسل‌های فعال این منطقه بوده است. همچنین کانون‌های متمرکزی از وقوع زلزله در محدوده شهرستان‌های دماوند، فیروزکوه و مناطق شمالی شهر تهران مشاهده می‌شود. این تحلیل امکان شناسایی مناطق پرخطر از نظر تکرار رخداد زلزله را فراهم می‌آورد و می‌تواند در اولویت‌بندی اقدامات کاهش خطر و تقویت زیرساخت‌ها مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۴- تحلیل Hot Spot زلزله‌های استان تهران



شکل ۵- تحلیل چگالی کرنل زلزله‌های استان تهران



شکل ۶- خطوط همپوشانی شبکه معابر استان تهران با محدوده ۱۰ کیلومتری گسل‌ها

۲-۳- نتایج حاصل از تحلیل همپوشانی محدوده تأثیر گسل بر شبکه معابر ۱-۲-۳- تحلیل همپوشانی محدوده تأثیر گسل بر شبکه معابر استان تهران نتایج حاصل از تحلیل همپوشانی بین لایه شبکه معابر استان تهران و محدوده بافر ۱۰ کیلومتری گسل‌ها نشان‌دهنده میزان قابل توجهی از آسیب‌پذیری در شبکه راه استان است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بخش

مقایسه نتایج دو تحلیل Hot Spot و چگالی کرنل نشان می‌دهد که منطقه شمالی و شمال شرقی استان تهران هم از نظر بزرگی زلزله‌ها و هم از نظر تعداد رخداد، وضعیت بحرانی تری نسبت به سایر مناطق دارد. این یافته با مطالعات زمین‌شناسی منطقه و توزیع گسل‌های فعال همخوانی دارد و می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه راه‌های استان در برابر زلزله‌های احتمالی آینده مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱- اطلاعات آماری مربوط به آسیب‌پذیری شبکه معابر استان تهران

اطلاعات آماری مربوط به طول کل شبکه معابر استان تهران	
Sum	37490764.119035
Count	191681
Min	0.035253
Max	35187.653986
Mean	195.58936
Standard Deviation	527.265476
اطلاعات آماری مربوط به طول همپوشانی شبکه معابر استان تهران با شعاع ۱۰ کیلومتری گسل‌ها	
Sum	22769200.494981
Count	84080
Min	0.0024
Max	12440.654069
Mean	195.567039
Standard Deviation	345.138928

اصلی و شریانی استان محسوب می‌شوند که این امر می‌تواند در شرایط پس از زلزله، دسترسی به مناطق آسیب‌دیده و امداد رسانی را با چالش‌های جدی مواجه سازد.

۳-۲-۲- تحلیل همپوشانی محدوده تأثیر گسل بر شبکه معابر شهر تهران

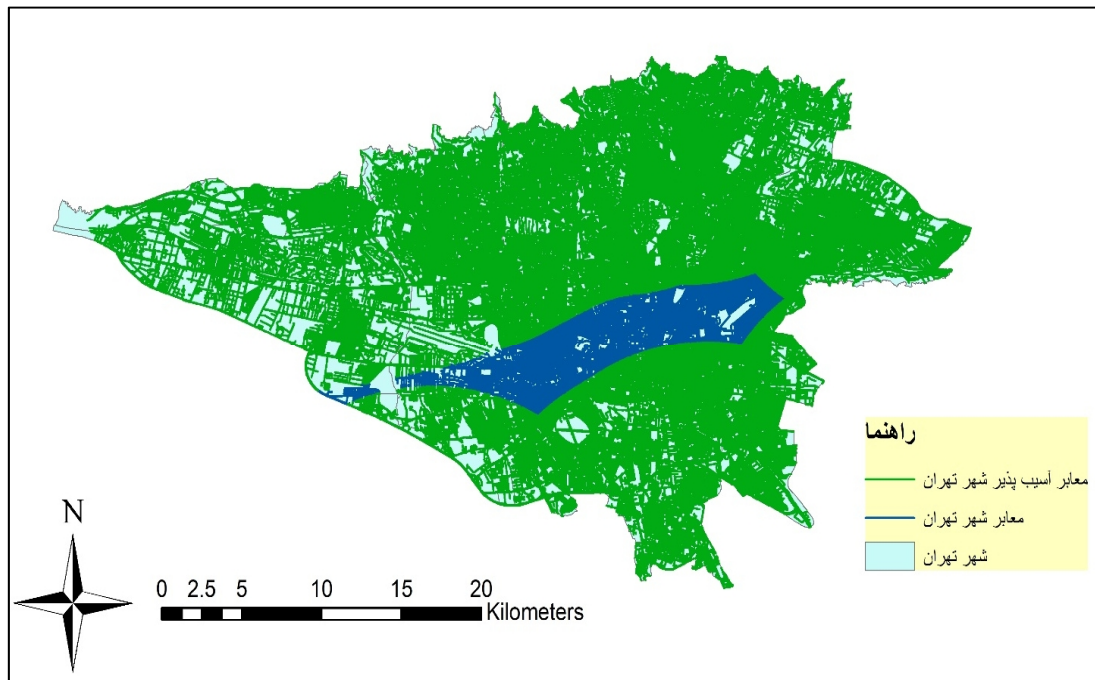
نتایج تحلیل همپوشانی در سطح شهر تهران بسیار هشداردهنده‌تر است. همان‌طور که در تصویر ۷ مشاهده می‌شود، تقریباً تمامی شبکه متراکم معابر شهر تهران (قسمت سبزرنگ و متراکم در مرکز نقشه) در محدوده خطر گسل‌ها قرار دارند.

محاسبات آماری انجام‌شده با روشی مشابه تحلیل استانی نشان می‌دهد که ۸۸/۴۳ درصد از کل شبکه معابر شهر تهران در محدوده ۱۰ کیلومتری گسل‌ها واقع شده‌اند. این آمار بسیار قابل تأمل است و نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای شبکه ارتباطی درون‌شهری تهران در برابر زلزله‌های احتمالی است. جدول ۲ جزئیات آماری این تحلیل را نمایش می‌دهد.

قابل توجهی از شبکه راه‌های استان تهران (به رنگ قهوه‌ای) در محدوده خطر گسل‌ها قرار دارند، درحالی‌که مسیرهای مشکی رنگ نشان‌دهنده شبکه معابر استان می‌باشند.

محاسبات آماری انجام‌شده با استفاده از تابع Summarize برای فیلد Shape_Length در لایه همپوشانی و مقایسه آن با طول کل شبکه معابر استان استخراج‌شده از جدول توصیفی با استفاده از ابزار Statistics نشان می‌دهد که ۶۰/۷۳ درصد از کل شبکه راه‌های استان تهران در محدوده خطر ناشی از گسل‌ها (شعاع ۱۰ کیلومتری) قرار دارند. جدول ۱ اطلاعات آماری مربوط به این تحلیل را نشان می‌دهد.

بررسی توزیع فضایی این مسیرهای آسیب‌پذیر نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز راه‌های آسیب‌پذیر در محورهای مرکزی و شمالی استان تهران است. این یافته با توجه به وجود گسل‌های فعال مشاء، شمال تهران و ری در این مناطق قابل توجه است. به‌طور مشخص، محور تهران-کرج، جاده‌های شمالی منتهی به فیروزکوه و دماوند و مسیرهای ارتباطی جنوب غربی استان بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. همچنین، تحلیل اهمیت راه‌های آسیب‌پذیر نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از راه‌های آسیب‌پذیر جزء راه‌های



شکل ۷- محدوده تأثیرپذیری گسل‌ها بر روی شبکه معابر شهر تهران تا شعاع ۱۰ کیلومتری

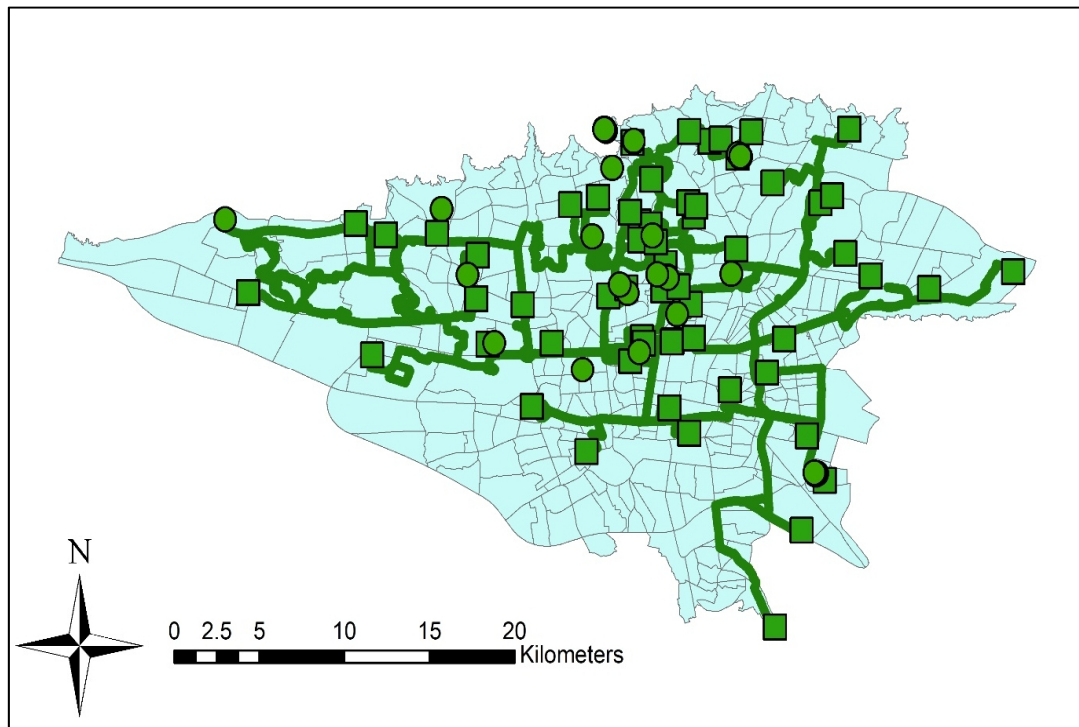
جدول ۲- اطلاعات آماری مربوط به آسیب‌پذیری شبکه معابر شهر تهران.

اطلاعات آماری مربوط به طول کل شبکه معابر شهر تهران	
Sum	13949222
Count	111348
Min	0.138856
Max	12472.774504
Mean	125.275918
Standard Deviation	236.499301
اطلاعات آماری مربوط به طول همپوشانی شبکه معابر شهر تهران با شعاع ۱۰ کیلومتری گسل‌ها	
Sum	12336147.901663
Count	99349
Min	0.006503
Max	8550.172182
Mean	124.16825
Standard Deviation	205.221974

بالای شبکه معابر در مرکز شهر تهران و هم‌زمان همپوشانی با محدوده گسل‌ها (رنگ آبی)، شرایط بحرانی‌تری را در این مناطق نشان می‌دهد.

مقایسه آسیب‌پذیری شبکه معابر شهر تهران (۸۸/۴۳ درصد) با شبکه راه‌های کل استان (۶۰/۷۳ درصد) نشان‌دهنده تمرکز بیشتر خطر در محدوده شهری است. این تفاوت قابل توجه ناشی از تمرکز گسل‌های فعال شمال تهران، ری و بخشی از گسل‌های مشاء در محدوده و اطراف شهر

بررسی دقیق‌تر توزیع فضایی معابر آسیب‌پذیر در سطح شهر تهران نشان می‌دهد که مناطق شمالی، شمال شرقی و مرکزی شهر تهران (مناطق ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸) بیشترین میزان آسیب‌پذیری را دارند. این موضوع با توجه به نزدیکی این مناطق به گسل شمال تهران و گسل مشاء قابل تبیین است. همچنین، در مناطق جنوبی شهر تهران، آسیب‌پذیری ناشی از گسل ری قابل مشاهده است. با توجه به تصویر، تراکم



شکل ۸- شناسایی بهترین معابر شهر تهران به منظور اسکان اضطراری شهروندان از نقاط تجمع با استفاده از شبکه تحلیل معابر

تهران است. همچنین تراکم بالای شبکه معابر در محدوده شهری تهران، احتمال همپوشانی با مناطق آسیب پذیر را افزایش داده است. این یافته اهمیت توجه ویژه به تاب آوری شبکه معابر درون شهری تهران و لزوم برنامه ریزی برای مسیرهای جایگزین در شرایط بحرانی را دوچندان می سازد.

۳-۳- نتایج حاصل از تحلیل شبکه

۳-۳-۱- تحلیل شبکه محل های اجتماع و مراکز اسکان اضطراری شهر تهران
نتایج حاصل از تحلیل شبکه محل های اجتماع و مراکز اسکان اضطراری شهر تهران نشان دهنده الگوی توزیع زمانی و مکانی دسترسی شهروندان به مراکز اسکان اضطراری در شرایط بحرانی پس از وقوع زلزله است. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، مسیرهای بهینه از مراکز تجمع به نزدیک ترین مراکز اسکان اضطراری با رنگ سبز نمایش داده شده اند.

بر اساس جدول ۱ موجود در فایل موارد تکمیلی، تحلیل آماری داده های حاصل از این آنالیز نشان می دهد که اگرچه به عنوان مثال مسیر شماره ۳ شهرک لاله از مسافت مناسب تری به مراکز اسکان اضطراری برخوردار هستند، اما مسیر شماره ۱ به دلیل زمان دسترسی کوتاه تر، مسیر مناسب تری برای اسکان اضطراری است.

جدول ۳ گزارشی از بهترین مسیرها از مراکز تجمع به مراکز اسکان اضطراری را نشان می دهد که شامل کوتاه ترین زمان و مسافت موجود برای جابجایی و سایر اطلاعات مرتبط است. لازم به ذکر است که در این تحلیل، مسیریابی انجام شده مربوط به فاز پس از وقوع زلزله است، زمانی که نیاز به انتقال و اسکان افراد در مراکز امن وجود دارد. «مراکز اسکان اضطراری» (که در برخی متون به عنوان پناهگاه نیز شناخته می شوند)، فضاهایی هستند که برای اسکان موقت آسیب دیدگان پس از فروکش کردن لرزش های اصلی زلزله و در فاز امداد و نجات مورداستفاده

جدول ۳- خروجی تحلیل شبکه مسیرهای انتقال از مراکز تجمع شهر تهران به مراکز اسکان اضطراری

شماره مسیر	مراکز تجمع	زمان اسکان اضطراری (دقیقه)	مسافت (کیلومتر)
۱	شهرک لاله - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	3.91406051	0.281080725
۲	فرهنگسرای شفق - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	1.509068934	0.103815617
۳	سرای محله سنگلج (دکتر حسابی) - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	1.819364813	0.063882904
۴	رهام - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.585072054	0.114729836
۵	سرای محله دزاشیب -	2.363175063	0.019721172
۶	سرای محله نفت -	3.503368286	0.162970084
۷	سرای محله -	2.059422854	0.127276218
۸	پردیس قدیر -	2.632850463	0.084936749
۹	شرکت مهندسی و خدماتی چاه پیمای مهرا -	1.243275906	0.015962878
۱۰	ایدئال گستر پاناسونیک -	1.949643809	0.055602477
۱۱	فرهنگسرای فناوری اطلاعات - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.135026208	0.045273169
۱۲	سرا محله -	1.152147727	0.006961219
۱۳	بخارست ۷ -	1.012197077	0.012959506
۱۴	فرهنگسرای ملل -	0	0.003018626
۱۵	فرهنگسرای اشراق - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	2.189137271	0.230556369
۱۶	بیمه ایران کد ۶۸۹۲ - سایبان سازان	1.971483488	0.018003799
۱۷	دفتر ساعی بادران گستران -	0.899146905	0.015822752
۱۸	باشگاه شماره یک شرکت نفت -	2.124306812	0.068563999
۱۹	سرای محله حکیمیه - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	6.264647668	0.282028235
۲۰	داده نما -	2.125876357	0.040432185
۲۱	برج حقیقت -	3.096639329	0.134484128
۲۲	تالار اندیشه - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.22114086	0.026026089
۲۳	تالار سوره - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.152103047	0.024159936
۲۴	دفتر مرکزی پاکیزه گوهرسپید - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.384820523	0.115544961
۲۵	تالار فردوسی - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	2.074518049	0.148842379
۲۶	شرکت آسانسور و پله برقی دینا -	0.405208447	0.033756445
۲۷	خانه ریاضیات تهران -	1.000662356	0.014440339
۲۸	پاساژ آسیا -	1.769816331	0.176692688
۲۹	سرای محله تجریش -	2.647586875	0.023229879
۳۰	سرای محله والفجر -	0.733076768	0.011725339
۳۱	هیئت زینبیون -	4.410177014	0.109541902

شماره مسیر	مراکز تجمع	زمان اسکان اضطراری (دقیقه)	مسافت (کیلومتر)
۳۲	خانه فرهنگ شمشیری - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	1.526846734	0.121885005
۳۳	سالن همایش‌های امام علی (ع) - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	1.635925877	0.188525154
۳۴	مرکز همایش‌های مجموعه فرهنگی ورزشی انقلاب - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.166350138	0.13578255
۳۵	دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران -	1.002862334	0.164012038
۳۶	خانه فرهنگ نصر - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.925227731	0.058286739
۳۷	مرکز همایش‌های صدرا -	0.241658099	0.026535752
۳۸	سرای محله سروآباد -	2.222603081	0.143387338
۳۹	مرکز رشد استعدادهای درخشان و - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.414715545	0.075732305
۴۰	سرای محله مشیریه - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.586945038	0.207575923
۴۱	موسسه پژوهشی کودکان دنیا -	1.42202401	0.038530218
۴۲	تالار مولوی -	0.13168898	0.000658706
۴۳	خانه موزه سیمین و جلال -	2.755029091	0.018974841
۴۴	مجموعه فرهنگی ۱۳ آبان - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.047971316	0.034245262
۴۵	دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران - Ghamar bh (pbh)	2.063902603	0.098111734
۴۶	خانه سینما - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.538971324	0.008593806
۴۷	شرکت بیمه ملت (سالن همایش‌های بیمه ملت) -	0.769929158	0.007791572
۴۸	سرای محله - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.054378184	0.098828499
۴۹	سرای محله باغ فردوس -	3.043884535	0.235542091
۵۰	سرای محله هرنودی - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	1.550664129	0.181060722
۵۱	موزه ملی تاریخ علوم پزشکی ایران -	0.360311182	0.006604717
۵۲	مجتمع تجاری سامان -	2.592548612	0.151092685
۵۳	انجمن اوتیسم - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	2.213671961	0.168753812
۵۴	موسسه فرهنگی هنری پایتخت - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	2.351757665	0.216517077
۵۵	مرکز فرهنگی کوثر - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	4.960840716	0.264192775
۵۶	باشگاه فرهنگیان - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	1.34192264	0.149644794
۵۷	مرکز همایش‌های بین‌المللی دانشگاه الزهرا (س) -	3.167013408	0.09842656
۵۸	سالن جابر ابن حیان - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	0.068578582	0.073352813
۵۹	سرای محله شهدای گمنام - دفتر ترجمه رسمی ۷۷۱ تهران	1.093090819	0.140558572

۷۳

شماره ۳۱

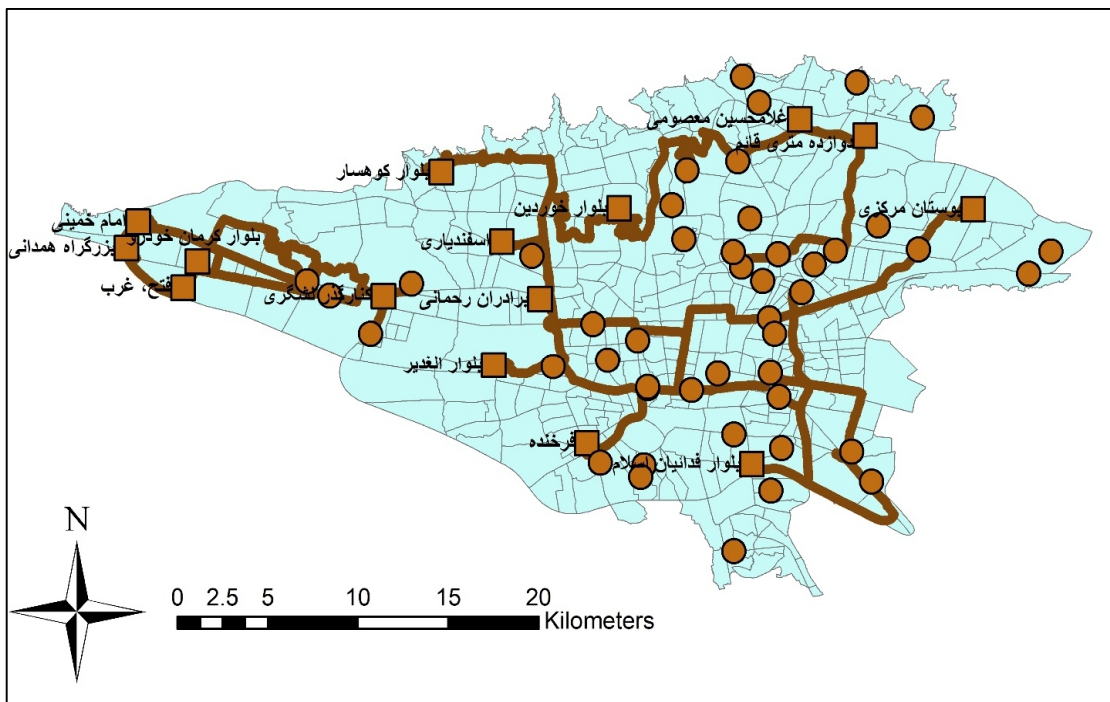
پاییز ۱۴۰۴

فصلنامه علمی

و پژوهشی



ارزیابی مناطق در معرض خطر گسل در شبکه راه استان تهران و برنامه‌ریزی مسیر اضطراری / قاسم علیزاده، محمدعلی نکویی، زهره عارفی خرمی



شکل ۹- مسیرهای بهینه امداد رسانی به نقاط آسیب پذیر شهر تهران

پارامترهای زمان و مسافت می شود. به عنوان مثال، به خیابان فرخنده تهران، ایستگاه ۸۱ آتش نشانی با داشتن مسافت ۲۲ متر، فاصله‌ی نزدیک تری نسبت به سازمان آتش نشانی دارد؛ اما از آنجاکه پارامتر زمان نسبت به مسافت برای ما مهم تر بوده، لذا سازمان آتش نشانی تهران با رکورد زمانی ۱ دقیقه، برای امداد رسانی مناسب تر است.

۴- بحث و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان می دهد آسیب پذیری قابل توجهی در شبکه معابر استان تهران وجود دارد، به طوری که ۴۳ درصد از شبکه معابر استان و به طور چشمگیری ۸۸/۴۳ درصد از شبکه معابر شهر تهران در محدوده پرخطر (شعاع ۱۰ کیلومتری گسل ها) قرار دارند. این یافته ها نشان دهنده ضرورت اتخاذ تدابیر جامع برای ارتقای تاب آوری شبکه راه استان تهران در برابر زلزله است. همچنین تحلیل شبکه، مسیرهای بهینه از نقطه نظر دو پارامتر زمان و مکان را

قرار می گیرند و نه برای پناه گرفتن در حین وقوع زلزله. این گزارش می تواند در برنامه ریزی های شهری و منطقه ای، مدیریت بحران و کاهش خطر پذیری زلزله در استان تهران مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲-۳- تحلیل شبکه ایستگاه های آتش نشانی و محل های آسیب پذیر شهر تهران

نتایج حاصل از تحلیل شبکه ایستگاه های آتش نشانی و محل های آسیب پذیر شهر تهران، توانایی سیستم امداد رسانی را در پاسخگویی به نقاط بحرانی پس از وقوع زلزله نشان می دهد. شکل ۹ مسیرهای بهینه از ایستگاه های آتش نشانی به محل های آسیب پذیر را نمایش می دهد.

جدول ۴، اطلاعات مربوط به مسیرهای بهینه از ایستگاه های آتش نشانی به نقاط آسیب پذیر را نشان می دهد. تحلیل این داده ها، منجر به انتخاب صحیح نوع مرکز امداد رسانی با توجه به

جدول ۴- زمان و مسافت بهترین مسیر برای امدادرسانی به نقاط آسیب پذیر تهران

محل	مراکز آتش نشانی شهر تهران	مدت زمان رسیدن به محل طی بهترین مسیر (دقیقه)	مسافت رسیدن به محل طی بهترین مسیر (متر)
بلوار کوهسار	مرکز آتش نشانی (سرپرستی غرب تهران)	3.57279351	221.1550418
	ایستگاه ۹۹ آتش نشانی	3.689432091	467.2036649
	ایستگاه ۶۷ آتش نشانی	3.713887901	303.7069189
امام خمینی	ایستگاه ۷۶ آتش نشانی	4.246421971	115.0673254
	ایستگاه ۲۰ آتش نشانی	4.660384075	250.6826515
بزرگراه همدانی	ایستگاه ۷۶ آتش نشانی	5.400607222	124.7137771
	ایستگاه ۲۰ آتش نشانی	5.814569326	260.3291032
غرب	ایستگاه ۷۶ آتش نشانی - فتح	4.231578	110.0656
	ایستگاه ۲۰ آتش نشانی - فتح	4.64554	246.272
بلوار کرمان خودرو	ایستگاه ۷۶ آتش نشانی	3.571615099	83.40703939
	ایستگاه ۲۰ آتش نشانی	3.985577203	219.0223655
اسفندیاری	مرکز آتش نشانی (سرپرستی غرب تهران)	2.307473334	115.4132483
	ایستگاه ۱۰۲ آتش نشانی	2.346796021	33.65140794
	ایستگاه ۹۹ آتش نشانی - اسفندیاری	2.424111914	361.4618715
بلوار خوردین	مرکز آتش نشانی (سرپرستی غرب تهران)	0.880560302	206.5230317
	ایستگاه ۹۹ آتش نشانی	0.997198882	452.5716548
برادران رحمانی	مرکز آتش نشانی (سرپرستی غرب تهران)	0.436304155	56.18230222
	ایستگاه ۹۹ آتش نشانی	0.552942736	302.2309254
	ایستگاه ۶۷ آتش نشانی	0.577398546	138.7341793
بلوار الغدیر	مرکز آتش نشانی (سرپرستی غرب تهران)	1.072355574	86.18242742
	سازمان آتش نشانی	1.173698712	97.19234102
	ایستگاه ۹۹ آتش نشانی	1.188994154	332.2310506
کنار گذر لشگری	ایستگاه ۲۰ آتش نشانی	1.083252122	31.61179993
	ایستگاه ۱۰۴ آتش نشانی تهرانسر	1.508065079	21.58407543
فرخنده	سازمان آتش نشانی	1.010009356	60.8271782
	ایستگاه ۶۷ آتش نشانی	1.101587689	82.91762814
	ایستگاه آتش نشانی ایستگاه ۸۱	1.244737141	22.18560245
بلوار فدائیان اسلام	ایستگاه ۹۹ آتش نشانی	0.966337354	283.4704668
	ایستگاه ۶۷ آتش نشانی	1.05705709	254.9723143
	ایستگاه ۱۵ آتش نشانی	1.072423793	135.9611484
غلامحسین معصومی	آتش نشانی	3.154087087	119.890385
	ایستگاه آتش نشانی صدر ۱۳۰	3.281159132	43.14290246
	آتش نشانی ستاد آجا	3.527027195	138.8068495

۷۵
شماره ۳۱
پاییز ۱۴۰۴
فصلنامه علمی

و پژوهشی



عازفی خرمی
برنامه ریزی مسیر اضطراری / قاسم علیزاده، محمدعلی نکویی، زهره ارزانی مناطق در معرض خطر گسل در شبکه راه استان تهران و

محل	مراکز آتش‌نشانی شهر تهران	مدت زمان رسیدن به محل طی بهترین مسیر (دقیقه)	مسافت رسیدن به محل طی بهترین مسیر (متر)
دوازده متری قائم	آتش‌نشانی ستاد آجا	1.340865706	106.5446499
	ایستگاه آتش‌نشانی مصلی	1.577139014	137.8394991
	ایستگاه آتش‌نشانی شماره ۷۱	1.63390213	64.89708023
بوستان مرکزی	ایستگاه شماره ۱۰۳	1.575287382	44.08385339
	ایستگاه ۹۹ آتش‌نشانی	3.33534132	251.0926181
	ایستگاه ۹۳ آتش‌نشانی	3.379588179	145.8479586

برای برنامه‌ریزی‌های آینده در راستای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل شهری باشد. با توجه به نتایج تحلیل‌های مکانی و شبکه‌ای انجام شده، پیشنهاد می‌شود اقدامات اساسی برای مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای معابر و پل‌های واقع در شعاع خطر گسل‌ها در اولویت قرار گیرد.

شناسایی و اولویت‌بندی شریان‌های حیاتی در مناطق پرخطر و اجرای برنامه مقاوم‌سازی آنها با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مهندسی زلزله، نخستین گام در این راستا است [۲۵]. به‌ویژه پل‌ها و تقاطع‌های غیرهمسطح به‌عنوان نقاط حساس شبکه معابر، نیازمند ارزیابی آسیب‌پذیری دقیق و اجرای طرح‌های مقاوم‌سازی هستند. استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی زلزله در پل‌ها و سازه‌های مهم راه، می‌تواند به کاهش چشمگیر آسیب‌های ناشی از زلزله منجر شود [۲۶].

همچنین با توجه به آسیب‌پذیری بالای شبکه معابر فعلی، طراحی و ایجاد مسیرهای جایگزین برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه راه ضروری به نظر می‌رسد [۲۷]. توسعه کمربندی‌های جدید با استانداردهای بالای مقاومت در برابر زلزله در اطراف مناطق پرخطر، ایجاد مسیرهای موازی با معابر اصلی آسیب‌پذیر و سرمایه‌گذاری در ساخت تونل‌های زیرزمینی مقاوم به‌عنوان جایگزین یا

به‌منظور جابجایی از مراکز تجمع به مراکز اسکان اضطراری و نیز، از مراکز آتش‌نشانی به برخی نقاط آسیب‌پذیر شهر تهران را شناسایی نمود. شایان‌ذکر است که در این تحلیل، با توجه به آسیب‌پذیری بالای راه‌های شهر تهران در برابر زلزله (۸۸/۴۳ درصد از کل شبکه معابر شهری)، رویکرد ما شناسایی بهینه‌ترین مسیرهای موجود با وجود محدودیت‌های زیرساختی بوده است. در این راستا، دو پارامتر اصلی زمان و مسافت در تحلیل شبکه مدنظر قرار گرفته است.

با توجه به اهمیت حیاتی فاکتور زمان در شرایط بحرانی پس از زلزله، تنظیمات شبکه به‌گونه‌ای انجام شده که کوتاه‌ترین زمان دسترسی به مراکز اسکان اضطراری محاسبه شود، اما هم‌زمان مسافت طی شده نیز به‌عنوان یک پارامتر جمعی در نظر گرفته شده است. این تحلیل کمک می‌کند تا در شرایط بحرانی، بهترین گزینه‌های ممکن برای انتقال و هدایت شهروندان به مراکز امن شناسایی شود. البته باید توجه داشت که در صورت تخریب گسترده این مسیرها در اثر زلزله شدید، نیازمند راهکارهای جایگزین و برنامه‌ریزی چند سطحی خواهیم بود که می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد.

هدف اصلی این مطالعه، ارائه تصویری واقع‌بینانه از وضعیت موجود شبکه معابر و الگوهای دسترسی فعلی است که می‌تواند مبنایی

مکمل معابر سطحی، از جمله راهکارهای پیشنهادی است.

نتایج تحلیل شبکه نشان می‌دهد بهینه‌سازی مسیرهای ارتباطی بین مراکز تجمع، مراکز اسکان اضطراری و مراکز امدادی نیز از ضروریات است. در این راستا، احداث مراکز اسکان اضطراری جدید در مناطق فاقد پوشش کافی با در نظر گرفتن دسترسی مطلوب به شبکه معابر، اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به تراکم جمعیتی بالا در کلان‌شهر تهران و ضرورت تأمین فضای امن در شرایط بحرانی، احداث مراکز اسکان اضطراری مقاوم با ظرفیت استاندارد و متناسب با جمعیت منطقه ضروری است. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد مراکز اسکان اضطراری با ظرفیت ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نفر، از نظر مدیریتی، امنیتی و تأمین خدمات، کارایی بالاتری نسبت به مراکز اسکان اضطراری بزرگ‌تر دارند [۲۸].

مراکز اسکان اضطراری با ظرفیت بیش از ۱۰۰۰ نفر، چالش‌های مدیریتی، بهداشتی و امنیتی قابل توجهی ایجاد می‌کنند، در حالی که مراکز اسکان اضطراری کوچک‌تر نیز از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود در هر منطقه شهری تهران، شبکه‌ای از مراکز اسکان اضطراری مقاوم با ظرفیت استاندارد ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نفر احداث شود که مجهز به سیستم‌های تأمین آب، برق اضطراری، تهویه مناسب، امکانات درمانی اولیه و سیستم‌های ارتباطی باشند. این مراکز اسکان اضطراری باید در فاصله مناسب از یکدیگر و با دسترسی آسان به شبکه معابر اصلی جانمایی شوند تا در زمان بحران، بیشترین پوشش جمعیتی را تأمین کنند.

بهینه‌سازی موقعیت ایستگاه‌های آتش‌نشانی با توجه به نتایج تحلیل Closest Facility و پوشش مناطق آسیب‌پذیر و اختصاص مسیرهای ویژه برای وسایل نقلیه امدادی در زمان بحران، از دیگر

اقدامات ضروری هستند. همچنین تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر و خسارت زمین‌لغزش در مطالعات آینده با توجه به سطح بالای خطر این رخدادهای طبیعی در استان تهران ضروری است [۲۹]. همچنین پیشنهاد می‌شود به منظور تعیین اهمیت و تأثیر نسبی عوامل مؤثر در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استان تهران، از روش مدل‌سازی آماری استفاده شود [۳۰].

ارتقای تاب‌آوری شبکه معابر، همچنین مستلزم توسعه زیرساخت‌های هوشمند و سیستم‌های پیشرفته مدیریت بحران است. توسعه شبکه‌ای از سنسورها و دوربین‌های نظارتی برای پایش وضعیت شبکه معابر در زمان واقعی، پیاده‌سازی سیستم مدیریت ترافیک اضطراری که قادر به تغییر الگوهای ترافیکی در شرایط بحران باشد و توسعه اپلیکیشن‌های موبایلی که در زمان زلزله، مسیرهای سالم و ایمن را به کاربران معرفی کنند، از جمله راهکارهای فناورانه پیشنهادی هستند.

تضمین استمرار خدمات ارتباطی در زمان بحران با ایجاد شبکه‌های رادیویی و ماهواره‌ای پشتیبان نیز باید مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر اقدامات فنی، اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریتی مناسب نیز ضروری است. تهیه و به‌روزرسانی مستمر طرح‌های اضطراری مدیریت بحران با تمرکز ویژه بر شبکه معابر، اجرای مانورهای دوره‌ای با هدف سنجش کارایی مسیرهای اضطراری و ارتقای آمادگی دستگاه‌های امدادی و ارتقای آگاهی عمومی درباره مسیرهای ایمن و اقدامات لازم در زمان زلزله، از جمله این اقدامات هستند.

الزام رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه‌تر در طراحی و ساخت زیرساخت‌های جدید حمل‌ونقل، با توجه به آسیب‌پذیری بالای منطقه ضروری است. بهره‌گیری از تجارب بین‌المللی و تقویت همکاری‌های بین‌بخشی نیز می‌تواند به ارتقای

تاب‌آوری شبکه معابر کمک شایانی کند. الگوبرداری از تجارب موفق کشورهایمانند ژاپن و ترکیه در زمینه تاب‌آوری شبکه‌های حمل‌ونقل، ایجاد پروژه‌های مشترک بین مراکز تحقیقاتی و سازمان‌های اجرایی برای توسعه فناوری‌های نوین مقاومت‌سازی و جلب مشارکت بخش خصوصی در توسعه و مقاومت‌سازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل از طریق سرمایه‌گذاری مشترک، می‌تواند در این زمینه راهگشا باشد.

در پایان، با توجه به محدودیت‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی به توسعه مدل‌های پیچیده‌تر آسیب‌پذیری شبکه معابر با در نظر گرفتن متغیرهای بیشترمانند کیفیت روسازی، عمر سازه‌ها و توپوگرافی منطقه بپردازند. همچنین، اجرای تحلیل‌های مبتنی بر سناریوهای مختلف زلزله با بزرگی‌ها و مراکز متفاوت، ایجاد مدل‌های پیش‌بینی آسیب به شبکه معابر بر اساس داده‌های تاریخی و شبیه‌سازی رایانه‌ای و بررسی هزینه-فایده راهکارهای پیشنهادی برای اولویت‌بندی اجرای آنها، می‌تواند به تکمیل نتایج این پژوهش و ارتقای دقت آنها کمک کند.

در مجموع، با توجه به آسیب‌پذیری بالای شبکه معابر استان تهران و به‌ویژه شهر تهران در برابر زلزله، اتخاذ رویکردی جامع، چندبخشی و پیشگیرانه برای ارتقای تاب‌آوری شبکه معابر امری حیاتی است که باید در اولویت برنامه‌ریزی‌های شهری و استانی قرار گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به‌منظور تحلیل تاب‌آوری استان تهران در برابر زلزله، ۴ آنالیز مختلف انجام پذیرفت. نتایج تحلیل Hot Spot نشان داد که خوشه‌های معناداری از زلزله‌های با بزرگی بالا (نقاط داغ) در بخش‌های شمالی و شمال شرقی استان تهران و منطبق بر مسیر گسل‌های شمال

تهران و مشاء وجود دارد. همچنین خوشه‌هایی از زلزله‌های با بزرگی کمتر (نقاط سرد) در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی استان قابل مشاهده است.

نتایج تحلیل چگالی کرنل نیز نشان داد که بیشترین تراکم رخداد زلزله در محدوده شمالی و شمال شرقی استان تهران و در امتداد گسل‌های فعال این منطقه بوده است. همچنین کانون‌های متمرکزی از وقوع زلزله در محدوده شهرستان‌های دماوند، فیروزکوه و مناطق شمالی شهر تهران مشاهده شد.

نتایج حاصل از تحلیل همپوشانی بین لایه شبکه معابر استان تهران و محدوده بافر ۱۰ کیلومتری گسل‌ها نیز میزان قابل‌توجهی از آسیب‌پذیری در شبکه راه استان را نشان داد. محاسبات آماری انجام‌شده با استفاده از تابع Summarize برای فیلد Shape_Length در لایه همپوشانی و مقایسه آن با طول کل شبکه معابر استان استخراج‌شده از جدول توصیفی با استفاده از ابزار Statistics همپوشانی ۶۰/۷۳ درصدی با محدوده خطر ناشی از گسل‌ها (شعاع ۱۰ کیلومتری) را نشان داد.

نتایج تحلیل همپوشانی در سطح شهر تهران بسیار هشداردهنده‌تر بود به‌طوری‌که محاسبات آماری، همپوشانی ۸۸/۴۳ درصدی شبکه معابر را با شعاع ۱۰ کیلومتری گسل‌ها نشان داد. تحلیل‌های فوق‌نهایتها یک تحلیلی جامع برای مسئولان مربوطه به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری استان تهران در برابر زلزله بوده، بلکه با روشن‌سازی مسیرهای بهینه‌ی امدادسانی و انتقال به مراکز اسکان اضطراری، به ارتقای پارامتر تاب‌آوری شهر تهران در برابر زلزله کمک شایانی می‌کند.

۶- قدردانی

نویسندگان اعلام می‌دارند که این پژوهش بدون دریافت کمک مالی از هیچ نهاد یا سازمان خاص

disasters,” *Glob. Environ. Chang.*, vol. 18, no. 4, pp. 598–606, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013>.

12. S. L. Cutter, K. D. Ash, and C. T. Emrich, “The geographies of community disaster resilience,” *Glob. Environ. Chang.*, vol. 29, pp. 65–77, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005>.

13. A. Al Raihan et al., “A framework for community level disaster resilience index,” 2022. [Online]. Available: <https://www.preventionweb.net/media/85537/download?startDownload=20250712>

14. C. S. Renschler, A. E. Frazier, L. A. Arendt, G.-P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, and M. Bruneau, “A framework for defining and measuring resilience at the community scale: The PEOPLES resilience framework,” MCEER Buffalo, 2010. [Online]. Available: https://www.esf.edu/glrc/library/documents/FrameworkforDefiningandMeasuringResilience_2010.pdf

15. S. B. Miles and S. E. Chang, “ResilUS-Modeling Community Capital Loss and Recovery,” in 14th Annual World Conference on Earthquake Engineering, 2008, pp. 459–465. doi: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_09-01-0095.PDF.

16. M. Amin, “Toward secure and resilient interdependent infrastructures,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 67–75, 2002, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2002\)8:3\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2002)8:3(67)).

17. Y. Kuwata and S. Takada, “Effective emergency transportation for saving human lives,” *Nat. hazards*, vol. 33, pp. 23–46, 2004, doi: <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000035003.29275.32>.

18. M. Peggion, A. Bernardini, and M. Masera, “Geographic information systems and risk assessment,” 2008. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/38613171.pdf>

19. T. Rashed and J. Weeks, “Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas,” *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 17, no. 6, pp. 547–576, 2003, doi: <https://doi.org/10.1080/1365881031000114071>.

20. S. Lhomme, D. Serre, Y. Diab, and R. Laganier, “GIS development for urban flood resilience,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 129, pp. 661–671, 2010, doi: [10.2495/SC100561](https://doi.org/10.2495/SC100561).

21. <https://ostan-th.ir/page/695/%D8%AC%D8%BA%D8%B1%D8%A7%D9%81%DB%8C%D8%A7.html>,

۷- منابع

۱. س. م. موسوی، م. عابدینی و ا. اسمعیلی عوری، «ارزیابی خطر زمین‌لرزه در حوزه‌ی شهری ایذه با استفاده از مدل‌های چندمعیاری WLC و AHP در محیط GIS»، مدیریت بحران، vol. 4, no. 1, pp. 93–101, 2015, [Online]. Available: https://www.joem.ir/article_14934.html

2. M. Nojavan, E. Salehi, B. Omidvar, and M. Nojavan, “An analysis of the effects of human settlements on increasing and strengthening the natural disasters: a case study of Iran,” *J. Res. Ecol.*, vol. 5, no. 1, pp. 515–530, 2017, doi: <http://ecologyresearch.info/documents/EC0336.pdf>.

3. <https://amar.org.ir/statistical-information/statid/52299>, «جمعیت به تفکیک»، تقسیمات کشوری (تا سطح آبادی) - تهران - سرشماری ۱۳۹۵، مرکز آمار ایران.

4. F. Kamranzad, H. Memarian, and M. Zare, “Earthquake Risk Assessment for Tehran, Iran”, 2020. doi: 10.3390/ijgi9070430.

5. S. Soltani, “3D modeling of the Tehran sedimentary basin: impact on seismic risk assessment,” 2023, Université Grenoble Alpes [2020-...]; International Institute of Earthquake doi: <https://theses.fr/2023GRALU032>.

6. M. Kheirizadeh Arouq, M. Esmailpour, and H. Sarvar, “Vulnerability assessment of cities to earthquake based on the catastrophe theory: a case study of Tabriz city, Iran,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 79, pp. 1–21, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09103-2>.

7. <http://irsc.ut.ac.ir/bulletin.php?lang=fa>, “مرکز لرزه‌نگاری کشوری،” موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

8. W. E. Westman, “Resilience: concepts and measures BT- Resilience in mediterranean-type ecosystems,” B. Dell, A. J. M. Hopkins, and B. B. Lamont, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 1986, pp. 5–19. doi: 10.1007/978-94-009-4822-8_2.

9. B. Walker and D. Salt, *Resilience practice: building capacity to absorb disturbance and maintain function*. Island press, 2012. doi: <https://muse.jhu.edu/pub/19/article/544351/summary>.

10. R. J. T. Klein, R. J. Nicholls, and F. Thomalla, “Resilience to natural hazards: How useful is this concept?,” *Glob. Environ. Chang. part B Environ. hazards*, vol. 5, no. 1, pp. 35–45, 2003, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.02.001>.

11. S. L. Cutter et al., “A place-based model for understanding community resilience to natural

”استانداری تهران“

22. J. Ritz et al., “Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran),” *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 117, no. B6, 2012, doi: <https://doi.org/10.1029/2012JB009147>.

23. <https://datagis.ir/>, “مرکز داده‌های جغرافیایی ایران.”

۲۴. م. پور، “تحلیل زمین‌شناسی زمین‌لرزه‌های استان.” [Online]. Available: ۱۳۹۳

<https://www.irna.ir/news/81282107/171->

ایلام-۱۸۷-و-تحلیل-زمین-شناسی-زمین-لرزه-های-

استان

۲۵. ا. پیغاله و م. ذوالفقاری، «مقایسه‌ی مدل بهینه‌سازی تصادفی و سایر روش‌های احتمالی برای اختصاص منابع اقتصادی جهت کاهش ریسک لرزه‌ای منطقه‌ای»، مدیریت بحران، vol. 4, no. 1, pp. 17–39, 2015, [Online]. Available:

https://www.joem.ir/article_14929.html

26. L. Capacci, F. Biondini, and D. M. Frangopol, “Resilience of aging structures and infrastructure systems with emphasis on seismic resilience of bridges and road networks,” *Resilient Cities Struct.*, vol. 1, no. 2, pp. 23–41, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2022.05.001>.

27. “FEMA. (2021). Design Guidance for Shelters and Safe Rooms (FEMA P-453, 2nd Edition). Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.”

۲۸. ح. توکلی، م. مگیثی و ا. پیغاله، «برآورد احتمال انسداد مسیر در شبکه حمل‌ونقل درون‌شهری پس از وقوع زلزله با استفاده از الگوریتم بی‌زی (مطالعه موردی: شهر بابل)»، مدیریت بحران، vol. 11, no. 1, pp. 49–66, 2022, [Online]. Available:

https://www.joem.ir/article_251422.html

29. “FEMA. (2021). Design Guidance for Shelters and Safe Rooms (FEMA P-453, 2nd Edition). Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.”

۳۰. آ. کرنژادی، م. اونق و ا. سعدالدین، «پهنه بندی خطر و خسارت زمین لغزش»، مدیریت بحران، vol. 4, no. 1, pp. 51–62, 2015, [Online]. Available: https://www.joem.ir/article_14931.html

۳۱. ا. امیراحمدی، ج. جمال آبادی و ر. دانشفر، «مدل‌سازی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های حوضه لتیان با استفاده از مقایسه آماری ۲ متغیره»، مدیریت بحران، vol. 11, no. 1, pp. 97–127, 2022, [Online]. Available:

https://www.joem.ir/article_251425.html